

LÄMMÖNTALTEENOTTO VILJANKUIVAUKSESSA LÄMMÖNVAIHTIMILLA

Kalle Juusela
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroteknologia
Maaliskuu 2019

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Kalle Juusela			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Lämmöntalteenotto viljankuivauksessa lämmönvaihtimilla			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma	Aika — Datum — Month and year Maaliskuu 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages s. 39	
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Tutkielman tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa passiivisilla lämmönvaihtimilla toimiva ja kustannustehokas lämmön talteenottojärjestelmä viljankuivaamoon. Lisäksi tavoitteena oli selvittää lämmönvaihtimien toimintaa viljankuivauksen olosuhteissa. Tärkeimpänä tavoitteena oli selvittää järjestelmän energiansäästö sekä sen kannattavuus.</p> <p>Lähes kaikki Suomessa korjattava viljasato pitää säilöä jotenkin ja kuivaaminen lämminilmaeräkuivurilla on yleisin säilömistapa. Vilja kuivataan 14 prosentin alapuolelle, jotta mikrobien toimintakyky heikkenee viljassa. Lämminilmakuivauksessa viljassa oleva vesi pyritään saamaan viljan läpi kulkevan lämpimän ilman mukaan. Kuivurista virtaava poistoilma sisältää lämmintä ilmaa ja veden höyrystymislämpöä, joka on sitoutuneena vesihöyryyn.</p> <p>Kuivurin poistoilman mukana suuri määrä energiaa menetetään täysin hukkaan. Lämmönvaihtimien avulla osa poistoilman energiasta olisi mahdollista siirtää kuivurin imuilmaan. Roskainen ja kostea poistoilma asettaa omat vaatimuksensa lämmönvaihtimille. Aikaisemmin passiivisella lämmön talteenottojärjestelmällä tehdyissä kokeissa on päästy noin 15 – 25 % energian säästöön. Kokeet ovat tehty kuitenkin pienoiskuivureilla, joten käytännön kokoluokan kokeet olivat välttämättömät toimivuuden todistamiseksi.</p> <p>Kuivauskokeissa päästiin passiivisen lämmön talteenottojärjestelmän avulla keskimäärin noin 17 % energian säästöön. Säästävän energian osuus vaihteli hyvin paljon kuivauksen eri vaiheissa sekä erilaisissa olosuhteissa. Kuivauskokeiden olosuhteet olivat keskimääräistä epäsuotuisimmat tätä suuremman energian säästön saavuttamiseksi. Lämmönvaihtimet toimivat tehokkaasti pitäen hyötysuhteen korkeana kaikissa kuivauskokeissa. Lämmönvaihtimet likaantuivat hieman kuivauskokeiden aikana. Lämmön talteenottojärjestelmän investoinnista on mahdollista saada kannattava. Energian hinnan noustessa myös lämmön talteenoton kannattavuus nousee.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Viljankuivaus, lämmöntalteenotto, latenttilämpö, poistoilma			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasivat Laura Alakukku ja Tapani Jokiniemi			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Kalle Juusela			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Heat recovery in grain drying by heat exchangers			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agrotechnology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year March 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 39 p.
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>The aim of this study was to design and implement a heat recovery system to the grain dryer that works efficiently and cost-effectively with passive heat exchangers. The aim was also to investigate the operation of heat exchangers under grain drying conditions. The most important objective of this study was to clarify the energy saving of the system and its profitability.</p> <p>Almost all grain harvested in Finland must be preserved somehow, and the drying on the hot-air batch dryer is the most general preserving way. The grain is dried below 14 moisture content percent to reduce microbial action in the grain. In the hot-air drying, an attempt is to make the hot air to go through the grain and evaporating the water from the grain. The exhaust air which flows from the dryer contains warm air and heat which is in the form of evaporated water.</p> <p>While the exhaust air is flowing out of the dryer in the process, a large amount of energy is permanently lost. With heat exchangers, it would be possible to transfer some part of outflowing exhaust heat energy to the suction air of the dryer. Dirty and damp exhaust air sets its own requirements for heat exchangers. Previously, passive heat recovery experiments have resulted in approximately 15-25% energy savings. However, the experiments have been made on the research dryer so the experiments with the practical size solution were necessary to prove the concept.</p> <p>In this study, an average of about 17% energy savings were achieved in drying experiments using a passive heat recovery system. The share of the saved energy varied significantly at different stages of the drying and at different conditions. The conditions of drying experiments were more unfavourable than average to reach. The heat exchangers functioned efficiently, keeping the efficiency rate effectively high in all the drying tests. Although they got slightly dirty during the drying tests. This study evinces that it is possible to gain profit from investing in a heat recovery system. When the price of the energy rises, the profitability of the recovery of the heat also will rise.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Grain drying, heat recovery, latent heat, exhaust air			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors: Laura Alakukku and Tapani Jokiniemi			

SISÄLLYS

LYHENTEET JA SYMBOLIT.....	5
1 JOHDANTO.....	6
2 KIRJALLISUUSKATSAUS.....	7
2.1 Viljankuivaus.....	7
2.1.1 Viljankuivauksen teoria.....	7
2.1.2 Energian kulutus viljankuivauksessa.....	8
2.1.3 Poistoilman ominaisuudet.....	9
2.2 Lämmön talteenotto.....	10
2.2.1 Lämmönvaihtimien toiminta.....	10
2.2.2 Lämmön talteenoton vaihtoehdot.....	10
2.2.3 Lämmön talteenoton tehokkuus.....	11
2.2.4 Poistoilman epäpuhtauksien hallinta.....	13
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET.....	14
4 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	14
4.1 Lämmön talteenottojärjestelmän suunnittelu ja rakentaminen.....	14
4.1.1 Lämmönvaihtimet.....	14
4.1.2 Lämmön talteenottojärjestelmän suunnittelu.....	16
4.1.3 Lämmön talteenottojärjestelmän rakentaminen.....	20
4.2 Lämmön talteenoton kokeet.....	21
4.2.1 Suosaaren tilan viljankuivaamo.....	22
4.2.2 Järjestelmän anturointi ja tiedonkeruu.....	22
4.3 Mittaustulosten käsittely.....	24
5 TULOKSET.....	25
5.1 Kuivauskokeiden tulokset.....	25
5.2 Lämmönvaihtimen likaantuminen.....	28
6 TULOSTEN TARKASTELU.....	29
6.1. Laitteiston toimivuus.....	29
6.1.1 Lämmönvaihtimien toimivuus.....	29
6.1.2 Mittausten onnistuminen.....	29
6.2 Lämmön talteenoton energian säästö.....	30
6.2.1 Lämmön talteenoton energian säästö.....	30
6.2.2 Lämmön talteenoton vuosittainen energiansäästö.....	31
6.3 Lämmön talteenoton kannattavuus.....	31
6.3.1 Lämmön talteenottolaitteiston investointi.....	31
6.3.2 Investoinnin kannattavuus.....	32
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	34
8 KIITOKSET.....	35
9 LÄHTEET.....	36

LYHENTEET JA SYMBOLIT

c_i	ilman ominaislämpökapasiteetti (MJ/kg)
$E_{kuiv.}$	kuivurin kuluttaman energian määrä (kWh)
L	kanavan väylän syvyys (m)
$m_{vpoisto}$	poistettavan veden määrä (kg)
m_{sato}	viljasadon määrä varastointikosteudessaan (kg)
$m_{vpoisto}$	poistettavan veden määrä (kg)
q_v	ilman tilavuusvirta (m ³ /h)
q_{om}	vedenpoistamisen ominaiskulutus (kWh/kg)
P	teho (kW)
ρ_i	ilman tiheys (kg/m ³)
Re	Reynoldsin luku
ΔT	lämpötilaero (°C)
v	virtaavan aineen nopeus (m/s)
ν	kinemaattinen viskositeetti (m ² s ⁻¹)
w_a	puitavan viljan kosteus (%)
w.b.	wet basis, märkäkosteus (%)
w_l	viljan varastointikosteus (%)

1 JOHDANTO

Lähes kaikki Suomessa korjattava viljasato on käsiteltävä jotenkin säilyvyyden takaamiseksi. Viljan kuivaaminen lämpimällä ilmalla on yleisin säilömismenetelmä, mikä on kuitenkin hyvin paljon energiaa kuluttava toimenpide. Energian hinnan nousun ja ilmastollisten vaikutusten myötä viljankuivauksen energian kulutukseen kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Erilaisia energian säästöön tähtääviä keinoja kuten kuivurin eristämistä, kuivauksen säätöä ja lämmön talteenottoa, on tutkittu Jokiniemen (2016) väitöskirjassa. Tässä tutkimuksessa keskitytään lämmön talteenoton toimintaan.

Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten (Ahokas ja Koivisto 1983, Jokiniemi ym. 2016) perusteella tiedetään, että viljan kuivauksen poistoilman lämmön talteenotolla saadaan noin 18 prosentin energian säästö. Tutkimukset on tehty pääosin pienoiskuivaajalla, joten käytännön kokoluokan testaus on välttämätöntä ennen laitteiston toimivuuden varmistamista.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa mahdollisimman toimiva ja kustannustehokas passiivinen lämmön talteenottojärjestelmä, joka koostuu ilma-ilma-lämmönvaihtimista. Laitteistoa testattiin yhtenä kuivauskautena. Kokeissa mitattiin järjestelmän tehokkuutta ja energian säästöpotentiaalia. Samalla testattiin myös laitteiston toimivuutta käytännön olosuhteissa erityisesti likaantumisen suhteen. Saatujen energian säästöjen perusteella selvitetään myös laitteiston kannattavuutta, joka on erittäin tärkeä osa lämmön talteenottoa.

Tutkimus on osa Helsingin yliopiston: Viljan kuivauksen energiatehokkaat teknologiat – VILKUTEK -hanketta. Hankkeessa pyritään testaamaan käyttökelpoisia keinoja säästää energiaa viljan kuivauksessa. Lämmön talteenoton kokeet toteutettiin Eurassa Suosaaren tilan viljankuivaajalla. VILKUTEK –hanketta rahoittaa Marjatta ja Eino Kollin säätiö.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Viljankuivaus

Suomessa korjattavan viljasadon kosteus on yleensä niin suuri, että se on käsiteltävä jotenkin säilyvyyden ylläpitämiseksi. Kosteutta poistamalla heikennetään edellytyksiä pilaantumisen alkamiselle. Korjattavan viljasadon korjuukosteus Suomessa on keskimäärin 20 % (w.b.) (Kirkkari ym. 2005). (Tästä eteenpäin viljan kosteuksista puhuttaessa tarkoitetaan (w.b.)). Suomessa kauppakelpoisen viljan toimitusraja on 14 % (Kirkkari ym. 2005). Viljan kuivaaminen lämminilma eräkuivurissa on yleisin tapa säilöä viljaa, sillä 85 – 90 % korjattavasta viljasta säilötään kuivaamalla (Palva ja Lötjönen 2005).

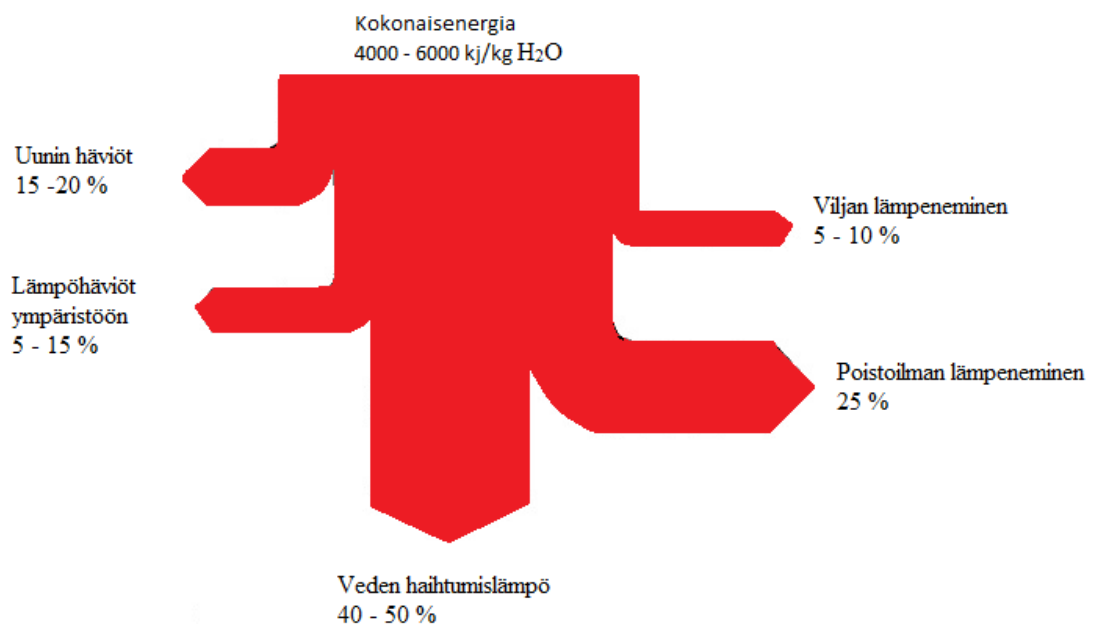
2.1.1 Viljankuivauksen teoria

Kosteus on sitoutunut jyviin fysikaalis-mekaanisesti, fysikaalis-kemiallisesti ja kemiallisesti (Peltola 1997). Fysikaalis-mekaanisesti sitoutunut vesi on usein pintavettä, joka poistuu helposti. Kemiallisesti sitoutunutta vettä ei poisteta viljan kuivauksessa, sillä se on lähinnä kidevettä. Fysikaalis-kemiallisesti sitoutunut vesi on syvemmällä jyvässä, jolloin sen pitää ensin siirtyä jyvän pintaan ja sen jälkeen ympäröivään ilmaan (Peltola 1997). Kosteus siirtyy suuremmasta vesipotentiaalista pienempään potentiaaliin, jolloin kuivausilman vesipotentiaalin pitää olla pienempi kuin kuivattavan viljan potentiaalin. Ulkoilman lämpötilaa nostetaan ennen kuivuriin menoa, jotta ilman suhteellinen kosteus laskisi ja samalla kuivauskyky paranisi merkittävästi (Hautala ym. 2013).

Vilja kiertää lämminilma eräkuivureissa ylhäältä alaspäin ensin varastokennojen läpi ja sitten kuivauskennojen läpi. Kuivauskennot sisältävät harjaksia, joita myöten ilma liikkuu viljan sekaan ja sieltä pois. Kuivurin alaosassa on syöttölaite, joka määrittelee viljan kiertonopeuden (Peltola 1997). Lämminilmakuivauksessa lämmintä ilmaa puhalletaan tai imetään sivusuunnassa kuivauskennossa olevan viljapatjan läpi. Jyvien kosteus pyritään saamaan siirtymään läpi virtaavaan ilmaan (Hautala ym. 2013). Kuivauslämpötila on yleensä noin 60 – 80 celsiusastetta (Hautala ym. 2013). On mahdollista käyttää myös korkeampia kuivauslämpötiloja, mutta ne saattavat heikentää jyvien elinvoimaisuutta (Suomala ja Peltola 1988).

2.1.2 Energian kulutus viljankuivauksessa

Viljan kuivaukseen energian kulutukseen vaikuttaa monet tekijät, kuten puintikosteus ja kuivausprosessi. Puintikosteus on suurin energian kulutukseen vaikuttava tekijä, sillä se vaikuttaa haihdutettavan veden määrään sekä kuivauksen kestoon (Ahokas ja Koivisto 1983). Puintikosteus on Suomessa keskimäärin 20 % ja se on yleisimmin kuivattava alle 14 % kosteuteen, jolloin puintikosteasta viljasta pitää poistaa 70 kilogrammaa vettä jokaista sadon 1000 kilogrammaa kohden. Yhden vesikilon haihduttamiseen kuluu noin 4000 – 6000 kJ energiaa (Ahokas ja Koivisto 1983). Veden ominaishöyrystyslämpö on 2260 kJ/kg, eli energiaa kuluu myös muuhun kuin veden haihtumiseen. Lämpöenergia jakautuu kuivausprosessissa kuvan 1 mukaisesti. Öljykäyttöisissä uuneissa osa energiasta poistuu savukaasujen kautta. Energiaa poistuu myös uunin pinnoilta, ilmakana-voista ja kuivurin koneiston kyljistä säteilemällä ympäristöön. Osa energiasta poistuu suoraan lämpönä poistoilman mukana ja osa sitoutuu lämpönä viljaan (Peltola 1997).



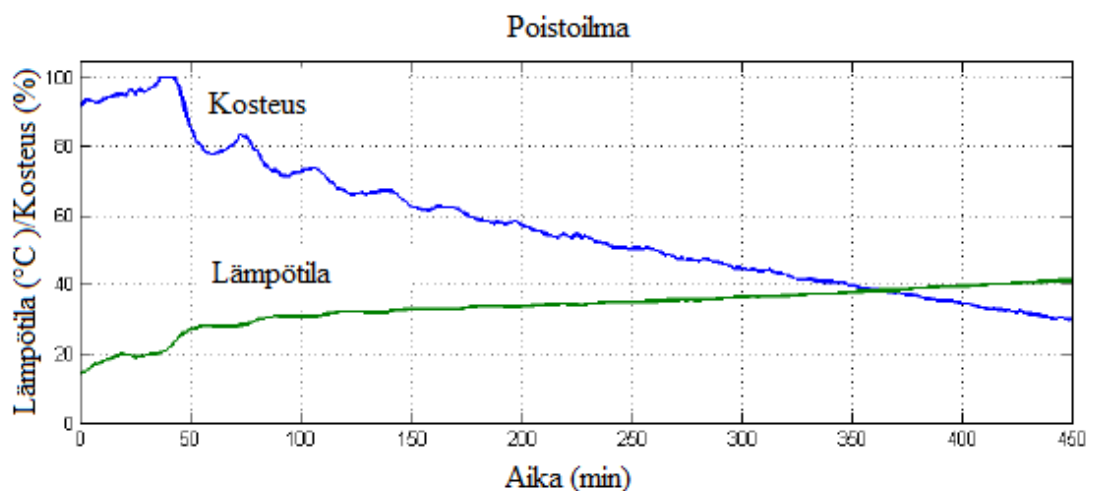
Kuva 1. Lämpöenergian jakautumista kuivurissa. Muokattu lähteestä (Ahokas ja Koivisto 1983).

Ulkoilman lämpötila vaikuttaa merkittävästi energian kulutukseen. Etenkin yöllä kuiva-
tessa energiaa kuluu laskeneen ulkolämpötilan vuoksi enemmän kuin päivällä. Suomes-
sa ulkolämpötila on keskimäärin 10 – 20 °C (Jokiniemi 2016). Kuivurin lämmitystar-
peen noustessa myös lämpöhäviöt kasvavat, kun ulkolämpötila on matala (Ahokas ja

Koivisto 1983). Kuivauslämpötilan nosto vähentää kuivauksen energian kulutusta ja nopeuttaa kuivauksen etenemistä, koska kuumempaan kuivausilmaan sitoutuu huomattavasti enemmän vettä (Suomi ym. 2003). Toisaalta kuivauslämpötilan nostaminen lisää lämpöhäviöitä ympäristöön (Ahokas ja Koivisto 1983).

2.1.3 Poistoilman ominaisuudet

Kuivausilman tila ja ominaisuudet muuttuvat, kun se kulkee kuivurin läpi. Poistoilman mukana poistuu noin 70 % kuivuriin saapuvasta energiasta, mistä osa on havaittavissa poistoilman lämpönä ja osa latenttilämpönä eli veden höyrystymislämpönä (Hautala ym. 2013). Poistoilman suhteellinen kosteus on kuivauksen alkuvaiheessa lähes 100 %, mutta se alkaa laskea kuivauksen edetessä tasapainokosteuden rajoittaessa sitä (Jokiniemi 2016). Tasapainotilanteessa ilman suhteellinen kosteus on noin 60 – 70 %, kun viljan kosteus on 14 % lämpötilasta ja viljalajista riippuen (Jokiniemi 2016). Poistoilman ja viljan lämpötilat nousevat kuivauksen edetessä poistoilman kosteuden laskiessa. Kuvas-
ta 2 voidaan havaita kuinka poistoilman lämpötila alkaa nousta kuivauksen edetessä ja etenkin poistoilman kosteuden laskiessa.



Kuva 2. Esimerkki poistoilman käyttäytymisestä viljan kuivauksen edetessä. Muokattu lähteestä (Hautala ym. 2013).

Kuivurissa kiertävä vilja on yleensä roskaista, jolloin viljanjyviä kevyemmät roskat lähtevät herkästi poistoilman mukaan. Ilmavirtaus on pidettävä viljan leijumisnopeutta pienempänä, ettei viljanjyvät lähde ilmavirran mukaan poistoilmakanavaan (Hautala ym.

2013). Poistoilman virtauksen suuruus vaihtelee erikokoisten ja erityyppisten kuivurien välillä. Virtausta kasvatetaan yleensä samassa suhteessa, kun kuivurin kyljen virtauspinta-ala kasvaa (Ahokas ja Koivisto 1983).

2.2 Lämmön talteenotto

2.2.1 Lämmönvaihtimien toiminta

Lämmönvaihtimet jaotellaan useimmiten niiden virtaussuuntien mukaan: myötä-, vasta- ja ristivirtalämmönvaihtimiin sekä edellä mainittujen yhdistelmiin. Lämmönvaihtimissa tapahtuva lämmön siirtyminen on konvektio eli kuljettuminen (Pihkala 1998). Useimmiten lämmönvaihtimissa käytetään pakotettua konvektiota, jossa fluidia eli väliainetta liikutetaan puhaltimella tai pumpulla (Jokilaakso 1987). Se on tehokkaampaa kuin luonnollinen konvektio, joka perustuu lämpötilaerojen aiheuttamaan tiheyden eroon eri fluidien välillä (Lampinen ym. 2008). Rekuperaattoreiksi kutsutaan lämmönvaihtimia, joissa kaksi ainevirtaa kulkevat jatkuvasti ainevirtojen välillä lämpöä siirtäen niitä erottavan seinämän läpi (Fagerholm 1986).

Lämmönvaihtimen virtauksen rajakerroksella on suuri merkitys konvektiolle. Laminaarissa virtauksessa lämmönsiirron rajakerros ei pääse sekoittumaan, jolloin se toimii tavallaan eristävänä kerroksena (Jokilaakso 1987). Ilman lämmönsiirtokerroin on heikompi kuin yleisimmillä lämmönvaihtimen materiaaleilla (teräs ja alumiini) (Jokiniemi 2016). Turbulentissa virtauksessa rajakerros pääsee sekoittumaan, jolloin myös lämpö siirtyy tehokkaammin (Jokilaakso 1987). Sen vuoksi lämmönvaihtimia suunniteltaessa pyritään saamaan turbulentti virtaus lämmönvaihtimiin. Ilman virtauksen nopeuden nostaminen tekee virtauksesta turbulenttia (Alfa Laval 2019).

2.2.2 Lämmön talteenoton vaihtoehdot

Viljankuivauksen lämmön talteenotossa voidaan käyttää aktiivista tai passiivista järjestelmää. Aktiivinen järjestelmä käyttää ulkopuolista energiaa lämmön talteenottoon, mutta passiivinen järjestelmä toimii ilman ulkopuolista energiaa. Aktiivisessa lämmön talteenottojärjestelmässä on usein lämpöpumppu, jolla tuodaan energiaa prosessiin. Passii-

vinen lämmön talteenottojärjestelmä koostuu useimmiten lämmönvaihtimista (Lampinen ym. 2008).

Lämpöpumpun avulla toimivien lämmön talteenottojärjestelmien toimintaa on tutkittu viljankuivauksessa, mutta useimmiten niiden hinta on liian suuri saatuihin säästöihin nähden (Ahokas ja Koivisto 1983). Etenkin viljan kuivauksen teholuokkaan soveltuva lämpöpumppu nostaa järjestelmän hintaa. Suomessa on markkinoilla Calefa Oy:n kehittämä Mahoton lämmön talteenottojärjestelmä viljankuivaukseen. Calefan laitteisto sisältää lämpöpumppuyksikön, lämmönvaihtimet ja suodatusjärjestelmän. Suodatusjärjestelmä on toteutettu syklonilla ja paperisuodattimilla (Vesa Tamminen, Calefa Oy, suullinen tiedonanto 8.12.2016).

Passiivisen lämmön talteenottojärjestelmän käyttöä viljankuivauksessa on tutkittu vähemmän kuin lämpöpumpulla toteutettua lämmön talteenottoa. Passiivista lämmön talteenottoa on testattu ainakin pienoiskoekuivurissa. Jokiniemen (2016) kokeissa käytettiin vastavirta lämmönvaihdinta, joka oli aaltopellistä tehty ilma-ilma-lämmönvaihdin. Poistoilma kulki ylhäältä alaspäin lämmönvaihtimessa, jolla pyrittiin vähentämään lämmönvaihtimen likaantumista. Ulkoilma kulki lämmönvaihtimessa alhaalta ylöspäin, jolloin poistoilman ja ulkoilman lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Lämmönvaihdin osoittautui rakenteeltaan toimivaksi, eikä sen havaittu likaantuvan lainkaan kuivauskokeiden aikana (Jokiniemi 2016).

2.2.3 Lämmön talteenoton tehokkuus

Lämmönvaihtimien tehokkuutta ilmaistaan niiden hyötysuhteen avulla. Hyötysuhde kertoo kuinka suuren osan lämmöstä lämmönvaihdin siirtää tulovirtauksesta talteenottovirtaukseen (Jokilaakso 1987). Lämmön talteenoton tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi poistoilman ja ulkoilman lämpötilan ero. Suomessa lämmön talteenotosta tulee huomattavasti energiatehokkaampaa kuin lämpimämmissä maissa, koska ulkolämpötilat vaihtelevat noin 10 – 20°C asteen välillä kuivauskaudella (Jokiniemi 2016). Poistoilman lämpötila vaihtelee eri kuivausvaiheissa ja kuivureissa noin 20 – 40 °C asteen välillä (Ahokas ja Koivisto 1983).

Poistoilman kosteudessa on myös huomattava määrä energiaa sitoutuneena latenttilämmöksi, joka vapautuu kosteuden tiivistyessä vedeksi. Lämmön talteenoton tehokkuus paranee veden tiivistyessä lämmönvaihtimelle. Tiivistynyt vesi voi myös muodostaa kalvon lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinnalle, joka toimii eristävänä kerroksena (Hokajärvi 1986). Nopea ja turbulentti ilmavirta kuitenkin vähentää kalvolauhtumista. Veden tiivistyminen vaatii lämpötilan eron lämmönvaihtimen virtausten välille. Aktiivisella lämpöpumpun sisältävällä lämmön talteenottojärjestelmällä saadaan laskettua lämpöä keräävän väliaineen lämpötilaa, jolloin lämpöä siirtyy enemmän lämmönkeruun kiertoon (Fagerholm 1986). Lämpötilan eron lisäksi lämmönvaihtimessa vapautuva latenttilämpö lisää järjestelmän tehokkuutta (Fagerholm 1986).

Useissa passiivisella lämmön talteenottojärjestelmällä tehdyissä kokeissa on päästy keskenään hyvin samansuuruisiin energian säästöihin. Ahokkaan ja Koiviston (1983) tekemissä kokeissa ilma-ilma-levylämmönvaihtimella saavutettiin 15 – 25 % energian säästö ulkolämpötiloista riippuen. Jokiniemen (2016) pienoiskoekuivurissa tekemissä vastaavissa mittauksissa saavutettiin keskimäärin 18 % energian säästö. Sokhansanj ja Bakker-Arkema (1981) saavuttivat myös samanlaisen 18 % energiansäästön kokeissaan, jotka tehtiin putkilämmönvaihtimella ja osittain simuloimalla.

Lämpöpumpun käyttämisestä viljankuivauksessa on tutkittu maailmalla jonkin verran. Useimmissa tutkimuksissa kuivauslämpötilat ovat olleet hyvin matalia, jolloin lämpöpumpulla korvatusen tehon osuus on myös suurempi kuin korkeilla kuivauslämpötiloilla (Ahokas ja Koivisto 1983). Lisäksi järjestelmien teholuokat ovat olleet hyvin pieniä tavanomaisiin viljankuivauksen teholuokkiin nähden. Alhaisilla kuivauslämpötiloilla saatujen koetulosten vertailu on hankalaa käytännön kuivauslämpötiloihin. Ahokkaan ja Koiviston (1983) lämpöpumpulla tekemissä kokeissa kuivauslämpötila oli 30 astetta ja energian kulutus oli vain 34 % tavanomaisesta energian kulutuksesta. Kokeissa myös todettiin viljan kuivauksen olevan liian hidasta niin alhaisella kuivauslämpötilalla. Calefa Oy:n Mahoton lämmön talteenottojärjestelmällä on valmistajan mittausten mukaan mahdollista saavuttaa 38 – 50 % energian säästö, mutta järjestelmän hinta on erittäin suuri saatuihin säästöihin verrattuna (Juusela 2017). Tällä hetkellä olisi kuitenkin mahdollista saada 40 % investointituki lämmön talteenottolaitteistoon investointiin, koska sillä saadaan vähennettyä uusiutumattomien polttoaineiden käyttöä (Ruokavirasto 2019).

2.2.4 Poistoilman epäpuhtauksien hallinta

Viljan kuivurin poistoilma sisältää viljasta irronnutta pölyä ja epäpuhtauksia. Likainen ja kostea poistoilma aiheuttavat lämmön talteenotolle haasteita. Viljan pölyämiseen vaikuttavat etenkin viljan kosteus, puinti ja viljalajit. Viljalajeista ohra ja kaura pölyävät enemmän kuin ruis ja vehnä (Sariola ym. 1992). Lämmönvaihtimelle tiivistyvä kosteus voi auttaa poistoilman mukana kulkevia roskia kiinnittymään lämmönsiirtopinnoille, mikä heikentää lämmön siirtymisen tehokkuutta sekä voi tukkia lämmönvaihdinta (Ahokas ja Koivisto 1983). Lämmönsiirtopinnalle kertyvä likakerros eristää tehokkaasti pintaa, jolloin lämmönsiirron tehokkuus heikkenee huomattavasti (Motiva 2019). Tiivistynyt kosteus voi myös parantaa lämmönvaihtimen puhdistuvuutta. Etenkin tiivistynyt kosteus ja suuri ilman virtausnopeus voivat yhdessä puhdistaa lämmönvaihdinta. Viljan kuivurit ovat useimmiten varustettu esipuhdistimella, joka poistaa roskia imemällä niitä virtaavasta viljasta. Esipuhdistaja poistaa eniten roskia kuivurin täyttövaiheessa, mutta poistaa niitä myös koko ajan kuivauksen edetessä ja viljan kiertäessä (Manni 1991).

Poistoilman epäpuhtauksia on mahdollista poistaa suodattamalla tai pyörre-erottimella (Ahokas ja Koivisto 1983). Erilaiset keinot tuottavat kuitenkin lisää vastapainetta systeemiin ja lisäävät laitteiston kustannuksia merkittävästi. Suodatussystemit vaativat paljon suodattavaa pinta-alaa, sekä suodattimet pitäisi pystyä myös puhdistamaan helposti. Kosteaa poistoilma saattaa aiheuttaa ongelmia suodattimien toimintaan. Kuivurin poistoilman virtauksen ja roskaisuuden suuruus tekee suodattimien käytöstä erittäin hankalaa. Puhdistussysteemin tulisi olla huoltovapaa kuivauskaudella, sillä korjuukausi on yleensä muutenkin kiireinen.

Pyörre-erottimen eli syklonin toiminta perustuu keskipakoisvoimaan. Syklonin toimivuus viljan kuivaamoissa on huomattavasti parempi kuin muilla menetelmillä (Manni 1991). Poistoilma virtaa syklonin kyljestä sisään samalla ajautuen pyörteiseen liikkeeseen (Pihkala 1998). Pyörteinen liike saa raskaammat pölyhiukkaset törmäämään ulkokehällä syklonin seinään, jolloin ne valuvat kartion seiniä pitkin alas roskasäiliöön (Manni 1991). Puhdistunut ilma nousee syklonin keskellä olevaa putkea pitkin ulos. Kuivurin poistoilman virtaukselle mitoitettun syklonin koko on melko suuri, jolloin sen kustannukset nousevat hyvin suuriksi (Teca 2018). Syklonin käyttö on erittäin tehokas keino erotella poistoilman roskat erilleen (Sariola ym. 1992). Roskat saadaan hallitusti

talteen syklonin avulla ja se toimii suurillakin ilman virtauksilla, mutta se lisää myös virtausvastusta järjestelmään.

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tämän työn tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa mahdollisimman toimiva passiivisen lämmönvaihtimen avulla toimiva lämmön talteenottojärjestelmä viljankuivaamoon. Lisäksi tavoitteena on mittaamalla määrittää lämmön talteenoton energian säästö sekä tarkastella laitteiston kannattavuutta.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

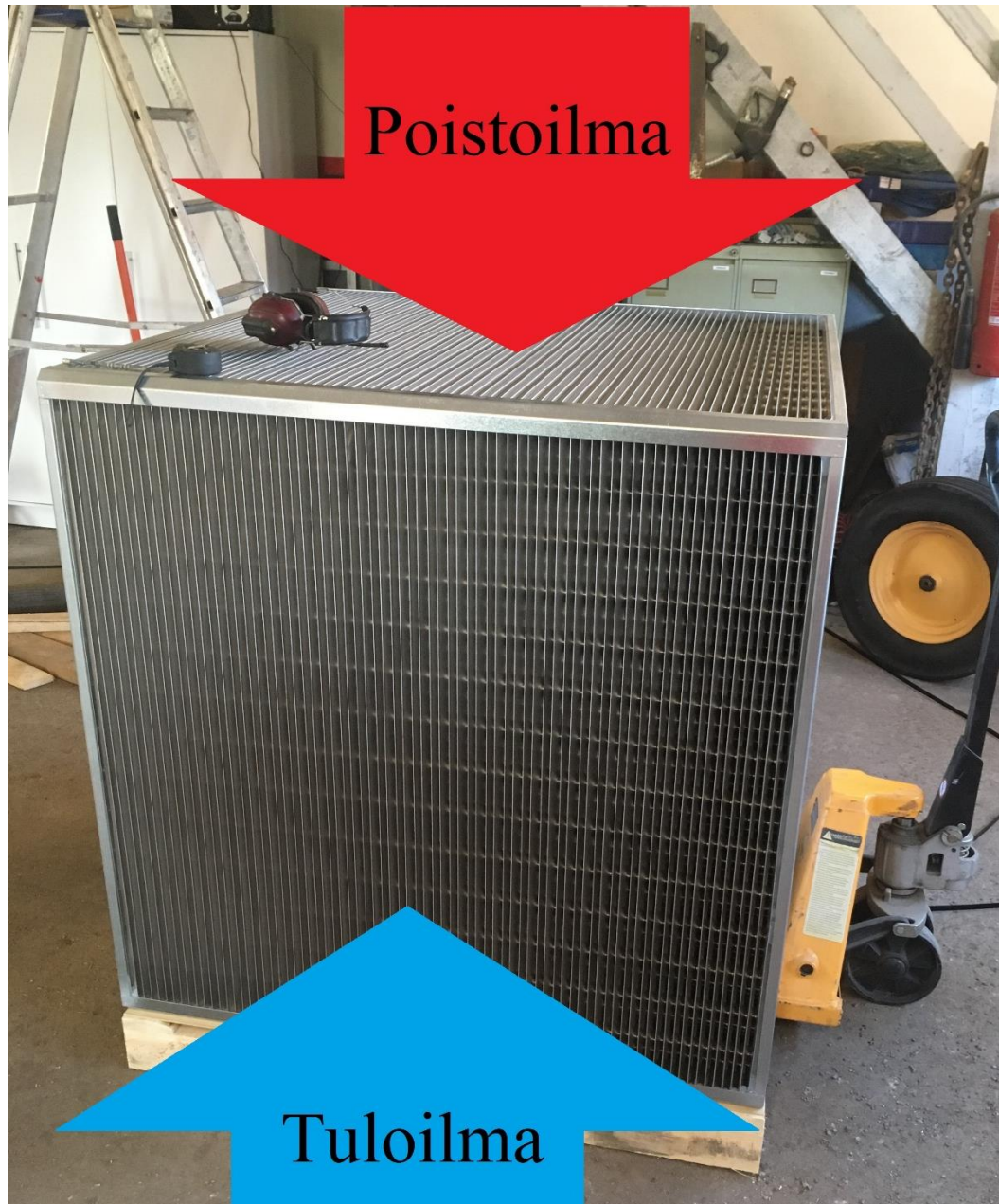
Lämmön talteenoton kokeita varten suunniteltiin ja rakennettiin lämmön talteenottojärjestelmä. Kuivuriin ja lämmön talteenottojärjestelmään asennettiin riittävä määrä antureita niiden tehojen määrittämiseksi. Lämpötilaerojen ja ilman virtausmäärien avulla määritettiin lämmön talteenoton ja uunin tehoja eri kuivauksissa sekä eri kuivauksen vaiheissa.

4.1 Lämmön talteenottojärjestelmän suunnittelu ja rakentaminen

4.1.1 Lämmönvaihtimet

Lämmön talteenottojärjestelmässä päädyttiin käyttämään Ekocoil Oy:n valmistamia levylämmönvaihtimia. Ne ovat tyypiltään LED-1200-1200-8.0 ristivirta ilma-ilmalevylämmönvaihtimia (kuva 3), joissa ilmavirrat kulkevat ristiin (Ekocoil 2019). Vaihtimista valittiin ulkomitoiltaan 1200 x 1200 x 1200 mm malli, koska sen läpimeno-pinta-ala oli sopiva pitämään ilman virtauksen nopeuden riittävän suurena lämmönvaihtimessa. Ilman virtauksen nopeus lämmönvaihtimissa on noin 7 m/s, kun ilman tilavuusvirtaus on noin 17 000 m³/h. Lämmönvaihtimien ilmaraot ovat 8 mm, mikä oli valmistajan avarin malli. Suuremmilla ilmaraoilla pyritään estämään lämmönvaihtimen tukkeutuminen sekä vähentämään ilman virtausvastusta. Valmistaja Ekocoilin mukaan yhden lämmönvaihtimen hyötysuhde on 55 – 66 % kuivalla ilmalla, mutta lämmönvaih-

timen lämmönsiirtopinnoille tiivistyvän veden kerrotaan parantavan hyötysuhdetta. Hyötysuhteen parantamiseksi päätimme asentaa kaksi lämmönvaihdinta sarjaan, jolloin hyötysuhteen pitäisi olla noin 80 % kuivalla ilmalla (Jouni Mäyrä, Ekocoil Oy, suullinen tiedonanto 3.4.2018).



Kuva 3. Ekocoil Oy:n valmistama LED-1200-1200-8.0 ristivirta levylämmönvaihdin, jossa poistoilma kulkee pystysuunnassa ja tuloilma kulkee vaakasuunnassa. Kuva: Kalle Juusela

Lämmönvaihtimet ovat valmistettu erittäin ohuesta alumiinilevystä, jotka ovat prässätty kennorakenteen mahdollistavaan muotoon. Erisuuntiin prässätyt levyt ovat kasattu yh-

teen siten, että ne muodostavat vuoroin ilmaraon vaakasuuntaan ja vuoroin pystysuuntaan. Lämmönvaihdin on kasattu liimaamalla levyt kulmista yhteen silikonikitillä, missä on lisäksi vahvikelevyt tukemassa rakennetta. Yhdessä lämmönvaihtimessa lämpöä vaihtavia pintoja on 150 kappaletta ja yhden pinnan pinta-ala on 1,44 m². Eli yhdessä lämmönvaihtimessa on yhteensä noin 216 m² lämpöä vaihtavaa pinta-alaa (Ekocoil 2019).

Alumiinin korroosion kesto on riittävä viljan kuivauksen olosuhteisiin ja sen lämmönjohtavuus on erinomainen (Fagerholm 1986). Ilman lämmönjohtavuus on kuitenkin hyvin paljon heikompi kuin alumiinin. Ilman virtauksen ollessa laminaarista alumiinin lämmönjohtavuus ei juuri vaikuta lämmön siirtymisen tehokkuuteen. Ilman virtaus on laminaarista Reynoldsin luvun ollessa alle 2100 ja turbulenttia luvun ollessa yli 4000 (Hautala ym. 2013). Kaavalla 1 voidaan laskea virtauksen Reynoldsin luku lämmönvaihtimessa. Reynoldsin luvuksi tulee noin 3500, kun ilman virtaus on 7 m/s, väylän syvyys on 0,008 m ja ilman kinemaattinen viskositeetti on 1,6*10⁻⁵ m² s⁻¹ (Jokiniemi 2016). Eli virtaus ei ole enää laminaarista vaan enemmän turbulenttia. Turbulentti virtaus estää ilman rajakerroksen syntymistä lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinnoille (Hautala ym. 2013).

$$Re = \frac{v * L}{\nu} \quad (1)$$

jossa

Re	=Reynoldsin luku
v	=virtaavan aineen nopeus (m/s)
L	=kanavan väylän syvyys (m)
ν	=kinemaattinen viskositeetti (m ² s ⁻¹)

(Hautala ym. 2013)

4.1.2 Lämmön talteenottojärjestelmän suunnittelu

Työn yhtenä tavoitteena oli suunnitella mahdollisimman toimiva lämmön talteenottojärjestelmä. Se suunniteltiin valittujen lämmönvaihtimien ympärille. Suunnittelun perustana käytettiin Jokiniemen tutkimuksessa saatuja kokemuksia lämmönvaihtimen toimivuudesta (Jokiniemi 2016). Poistoilman roskaisuuden vuoksi lämmönvaihtimet päätet-

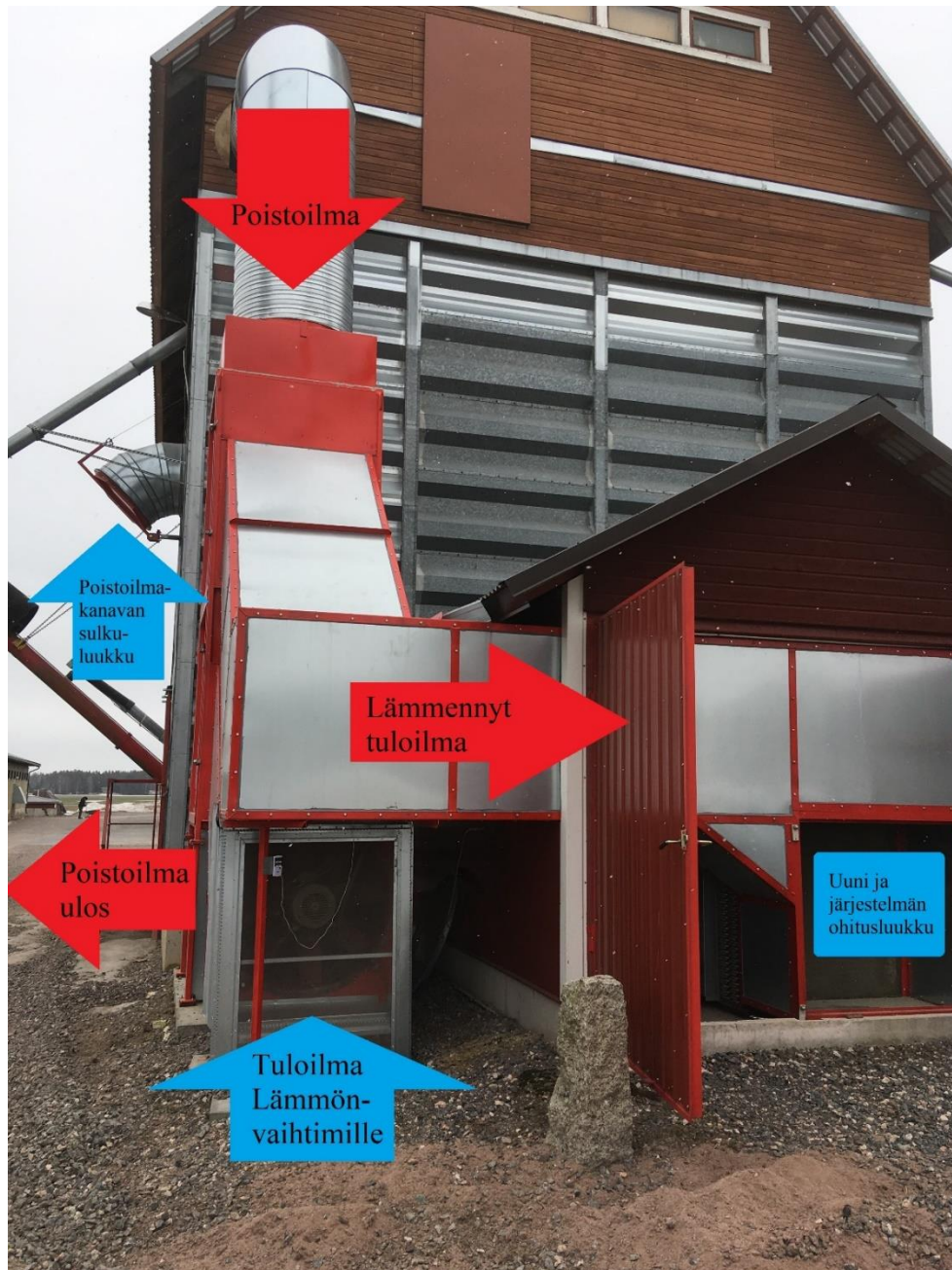
tiin asentaa päällekkäin, jolloin poistoilma ja mahdolliset roskat kulkevat ylhäältä alaspäin. Lisäksi sarjaan kytkentä kasvattaa ilman nopeutta rinnankytkentään verrattuna, jolloin lämmönvaihtimen hyötysuhde paranee (Jouni Mäyrä, Ekocoil Oy, suullinen tiedonanto 3.4.2018). Suurempi ilman nopeus voi myös pitää lämmönsiirtopintoja paremmin puhtaina. Lämmönvaihtimiin tiivistyvä vesi sekä niitä pestäessä syntyvä pesuvesi poistuu parhaiten painovoimaisesti suoraan alaspäin. Lämmönvaihtimien mahdollisen likaantumisen vuoksi pesumahdollisuus otettiin huomioon suunnittelussa. Lämmönvaihtimien päälle jätettiin noin 50 cm tyhjää tilaa, mikä mahdollistaa lämmönvaihtimien pesemisen painepesurilla. Lämmönvaihtimien etuseinälle suunniteltiin ovet, jotka mahdollistavat niiden pesemisen yläkautta.

Lämmön talteenottojärjestelmän paikan määrittäminen olemassa olevaan kuivaamoon on suunnittelun kannalta tärkeää. Tässä kohteessa kuivaamon poistoilmakanavan ulostulo ja kuivaamon uunihuone olivat viereisillä seinillä, mikä mahdollisti kanavien rakentamisen. Poistoilmakanava lähti heti kuivurin kyljessä olevien aksiaalipuhaltimien jälkeen suoraan ulos yhden metrin halkaisijaltaan olevana kanavana (kuva 4). Poistoilma päätettiin johtaa nykyisestä kanavasta T-haaran avulla yläviistoon kuivurin yläkertaan, josta kanava jatkuu ulos kohti uunihuonetta. Nykyisen poistoilman ulostulon eteen suunniteltiin saranoitu sulkuluukku (kuva 4), jota käytetään vaijerivinssillä. Saranoidulla luukulla mahdollistetaan poistoilman ohjaaminen ohi lämmönvaihtimien kuivauksen jäähdytysvaiheessa tai muuten lämmön talteenottojärjestelmän ohittaminen. Lämmön talteenottojärjestelmä päätettiin sijoittaa uunihuoneen vierelle, josta tuloilma on helppo johtaa uunin eteen (kuva 5).



Kuva 4. Saranoitu poistoilman sulkuluukku, jota käytetään vaijerivinssillä. Sulkemalla luukku poistoilma ohjautuu lämmönvaihtimille. Kuva: Kalle Juusela

Lämmönvaihtimien ympärille suunniteltiin RHS-putkipalkista kantava runko, joka seisoo neljällä jalalla tukevasti betonilaatan päällä (kuva 6). Rungon sivulle suunniteltiin ilmakotelo ja toiselle sivulle lähdöt tulevalle ja lähtevälle ilmalle. Ilmakotelot ja ilmakanavat tehtiin 0,75 mm paksuisesta sinkitystä levystä ja 50 mm leveästä kulmaraudasta. Kaikkien lämmönvaihtimen jälkeisten kanavien poikkipinta-ala oli vähintään 0,8 m², joka vastaa yhden metrin halkaisijalta olevan pyöreän kanavan poikkipinta-alaa.



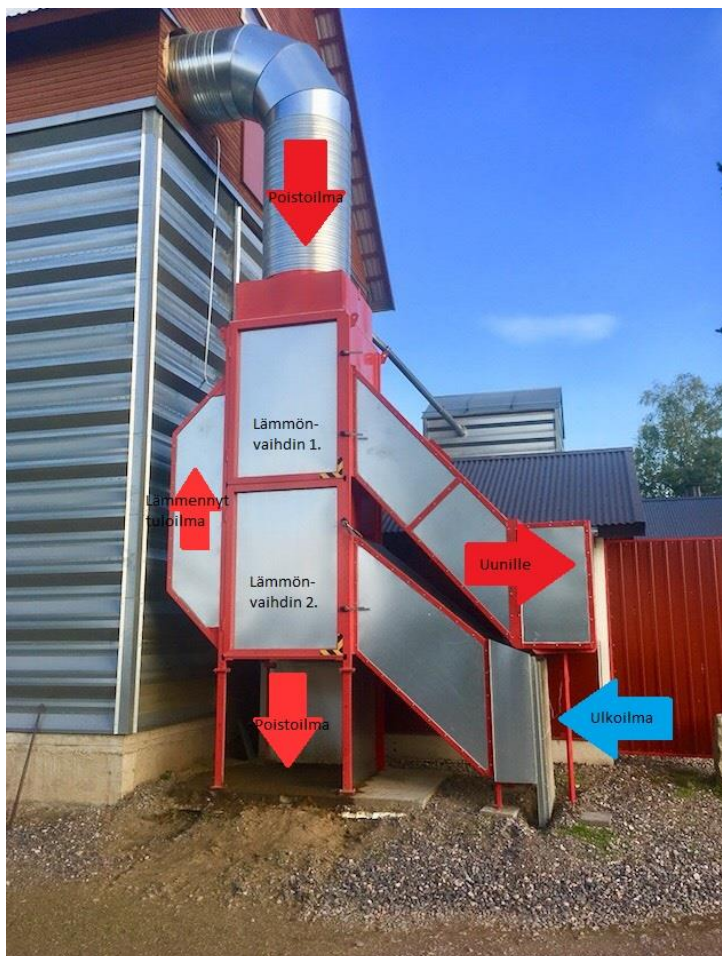
Kuva 5. Kuvassa vasemmalla alhaalla näkyy tuloilman imuaukko sekä lisäpuhallin. Kuvassa oikealla alhaalla näkyy uunin tuloilman imuaukon edessä oleva luukku, jolla voidaan ohittaa lämmön talteenottojärjestelmä. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy poistoilmakanavan pää, jossa on saranoitu sulkuluukku. Kuva: Kalle Juusela

Riittävän ilmavirran ylläpitäminen oli myös erittäin iso osa suunnittelua. Kyseisen kuivurin ilmavirtaus normaalisti on noin 17 000 m³/h ja tuolla virtauksella puhaltimien kokonaispaineentuottokyky on valmistajan mukaan noin 1350 Pascalia (Antti-teollisuus 2018). Valmistajan mukaan lämmönvaihtimet muodostavat noin 600 Pascalin painehäviön kyseisellä virtauksella (Jouni Mäyrä, Ekocoil Oy, suullinen tiedonanto 3.4.2018). Kuivurin koneiston ja putkistojen painehäviöt nousevat suuremmiksi kuin puhaltimen

suurin mahdollinen paineentuottokyky. Olemassa olevia puhaltimia ei lähdetty vaihtamaan vaan niiden tehoa päätettiin nostaa ja asentaa lisäpuhallin. Lisäpuhallin (kuva 5) päätettiin laittaa ennen lämmönvaihtimia tuloilman virtausta parantamaan.

4.1.3 Lämmön talteenottojärjestelmän rakentaminen

Lämmön talteenottojärjestelmä (kuva 6) rakennettiin Suosaaren tilan metallipajassa. Ensin kokoonpantiin laitteiston päärunko hitsaamalla 80 x 80 x 3 mm ja 40 x 40 x 3 mm RHS-palkista. Rungon toiseen kylkeen hitsattiin kulmaraudasta raamit ilmakoteloja varten. Rungon toiseen kylkeen hitsattiin lähdöt tulo- ja poistokanavaa varten. Rungon etuseinään tehtiin kaksi isoa saranoitua ovea lämmönvaihtimien asentamista ja puhdistamista varten. Kokoonpanon jälkeen runko hiekkapuhallettiin ja maalattiin. Ennen lämmönvaihtimien asentamista rungon kylkiin asennettiin sinkityt levyt. Levyt ja lämmönvaihtimet tiivistettiin kittaamalla.



Kuva 6. Lämmön talteenottojärjestelmä ja poistoilman ja tuloilman kulkusuunnat. Kuva: Kalle Juusela

Poistoilman kanava lämmönvaihtimille tehtiin yhden metrin halkaisijaltaan olevasta kierresaumaputkesta (kuva 6). Lämmönvaihtimilta lähtevä kuivausilman kanava tehtiin paikan päällä neliskanttisesta kanavasta. Uunin eteen tulevaan kanavaan tehtiin luukku, jolla voidaan ohittaa tarvittaessa lämmön talteenottojärjestelmä. Ovet ja luukut tiivistettiin solukumi tiivistenauhalla. Tuloilmaa varten rakennettiin myös pieni pätkä kanavaa pois päin lämmönvaihtimista, jotta kostea ja roskainen poistoilma ei päätyisi niin helposti kuivurin imuilmaksi. Tuloilmakanavan päähän (kuva 5) asennettiin 7,5 kW aksiaalipuhallin, jolla saatiin järjestelmään lisää paineentuottokykyä. Aksiaalipuhaltimien paineentuottokyky on huomattavasti huonompi kuin radiaalipuhaltimien (Antti-Teollisuus Oy 2018). Eli vastaavan tehoisilla radiaalipuhaltimilla olisi ollut mahdollista tuottaa riittävästi painetta ilman lisäenergian tarvetta. Lisäpuhaltimen asentamisen ja olemassa olevien puhaltimien tehon noston jälkeen puhaltimien kokonaisteho nousi 10 kW, minkä jälkeen kokonaisteho oli 22,5 kW. Puhaltimen eteen asennettiin tiheä verkko, joka estää roskien pääsyn järjestelmään.

Laitteiston rakentamiskustannusten perusteella tehtiin arvio kaupallisen laitteiston myyntihinnasta. Laitteiston hinnaksi määritettiin 14 000 euroa ja puhdistussyklonin hinnaksi määritettiin 6000 euroa. Lisäksi laitteiston asentamiskuluiksi arvioitiin 4000 euroa. Investoinnin kustannuksia on kuitenkin mahdollista pienentää 40 % investointituella.

4.2 Lämmön talteenoton kokeet

Lämmön talteenoton kokeita tehtiin 13 kuivauserän aikana elokuussa 2018. Kokeiden aikana kuivattiin ohraa (*Hordeum vulgare*), ruista (*Secale cereale*) ja vehnää (*Triticum aestivum*). Mittauksia tehtiin yöllä sekä päivällä. Kaikki mittauksissa käytetyt kuivauserät olivat lähes täysiä eli ne olivat tilavuudeltaan noin 39 – 42 m³. Ensimmäiseksi kuivattiin yksi erä ruista, minkä jälkeen kuivattiin neljä erää vehnää. Kuivattavan vehnän puintikosteudet vaihtelivat välillä 18,5 – 24 %, mutta ne sisälsivät runsaasti vihreitä tuleentumattomia jyviä. Kuivattavien kahdeksan ohran kuivauserän puintikosteudet olivat alhaisempia. Ne vaihtelivat välillä 15 – 16,5 %, eikä sen seassa ollut vihreitä jyviä juuri lainkaan. Kokeissa kuivausajat vaihtelivat jonkin verran ja kokeita tehtiin erilaisissa ulkolämpötiloissa. Kuivausten tavoitekosteus oli 13 %.

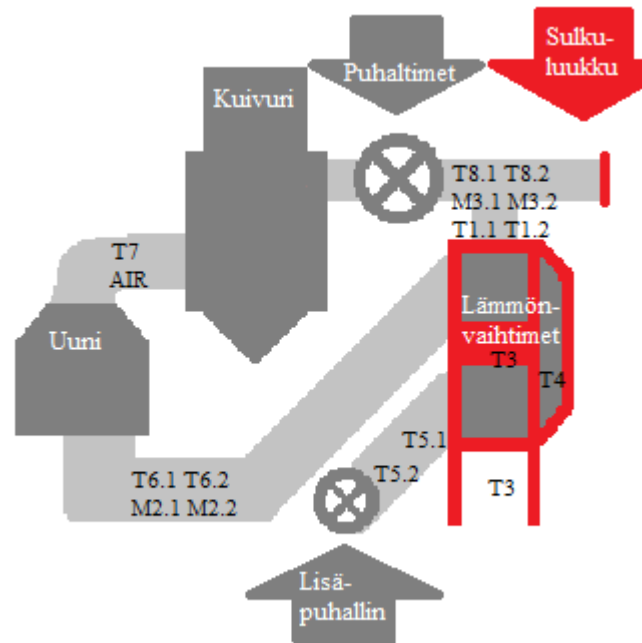
Kokeissa seurattiin lämmönvaihtimien likaantumista ja likaantumisen vaikutusta niiden toimintaan. Lämmönvaihtimien toimintaa seurattiin lämmönvaihtimien hyötysuhteen avulla sekä ilmamäärän avulla. Likaantumista seurattiin myös kuivausten välillä silmämääräisesti. Puhaltimien säädöt pidettiin samoina kaikissa mittauksissa. Ilmamäärän vaihteluilla pyrittiin havainnoimaan mahdollista lämmönvaihtimien virtausvastuksen kasvamista, mikä voisi johtua lämmönvaihtimien likaantumisesta tai osittaisesta tukkeutumisesta. Mittausdatan tallentaminen aloitettiin samaan aikaan kuivauksen kanssa ja se lopetettiin viljan jäähtymisen alkaessa.

4.2.1 Suosaaren tilan viljankuivaamo

Lämmön talteenoton kokeet tehtiin Suosaaren tilan viljankuivaamolla Eurassa elokuussa 2018. Viljankuivaamo on pakettikuivaamo, jossa on yksi erätoiminen sekavirtaus lämmönvaihtimilla. Kuivuri on Antti-Teollisuuden valmistama 34MF3-kuivuri, joka koostuu kolmesta kuivauskennosta ja neljästä varastokennosta. Kuivurin viljatilavuus on 43 m³. Kuivurin lämmönlähteenä on lämmön talteenottojärjestelmän lisäksi 500 kW alipaineöljyuuni, jonka edessä on lisäksi 300 kW vesikiertoinen radiaattori. Öljyuuni on varustettu kaksiteho öljypolttimella, jossa on tavanomaista pienemmät suuttimet. Kuivurin poistoilmakanavassa on peräkkäin kaksi 6,6 kW aksiaalipuhallinta, joiden tehoa säädelään kahdella taajuusmuuntajalla. Kuivausilman virtauksena pyritään pitämään noin 17 000 m³/h ja kuivauslämpötilana noin 90 °C.

4.2.2 Järjestelmän anturointi ja tiedonkeruu

Lämpötilojen mittaaminen on tärkeää eri kohdissa lämmön talteenottojärjestelmää, jotta pystytään havainnoimaan sen toimintaa. Lämpötilojen mittaamisessa käytettiin K-tyypin PVC-päällysteistä termoparikaapelia. Termopareja asennettiin yhteensä 16 kappaletta (kuva 7), siten että tärkeimpiin mittaushetkiin niitä asennettiin kaksi kappaletta. Termoparit perustuvat kahden eri metallin liitoksen tuottamaan lämpötilasta johtuvaan jännitteeseen (Pietiko 2019). Eli termoparien johtimien päät kierrettiin yhteen ja päällystettiin kutistesukalla.



Kuva 7. Kaavio järjestelmästä ja antureiden sijoittelusta. T1.1-T8.2 ovat lämpötila-antureita, M2.1-M3.2. ovat kosteusantureita ja AIR on ilmanvirtausanturi. Kuva: Kalle Juusela

Ilmavirran mittaamisessa käytettiin HK Instruments Oy:n valmistamia FloXact™-virtausantureita sekä DPT-Flow tilavuusvirtalähetintä. Virtausanturiputkien toiminta perustuu putken etu- ja takapuolella olevien reikien välille muodostuvaan paine-eroon. Paine-eron avulla lasketaan ilman virtauksen nopeus (HK Instruments 2017). Anturiputket asennettiin öljyuunin ja kuivurin väliseen ilmaputkeen ristiin, jolloin ne mittasivat ilmavirran suuruutta mahdollisimman kattavasti koko putken halkaisijalta. Virtauslähetin ilmoittaa virtauksen 0–10 voltin jännitesignaalin skaalattuna 25 000 m³/h.

Ilmavirran suhteellista kosteutta mitattiin poistoilmasta ja uunille menevästä ilmasta. Mittauksissa käytettiin HIH- 4000 antureita, joita oli kahdet molemmissa paikoissa (kuva 7). Viljan kosteuden mittauksessa käytettiin Wile 55 pikakosteusmittaria. Viljan kosteuksia mitattiin kuivauksen alussa, lopussa sekä noin kahden tunnin välein kuivauksen edetessä. Viljan kosteusmittaukset tehtiin kuivurin pohjakartion putken kautta otetuista näytteistä.

Mittausdata kerättiin Agilentin valmistamalla 34970A-tiedonkeruulaitteella. Tiedonkeruulaitteeseen oli yhdistetty kannettava tietokone, jolla sitä ohjattiin ja luettiin AgilentBenchLink-ohjelman avulla. Tiedonkeruulaite tallensi mittaustulokset tietokoneeseen.

muistiin 30 sekunnin välein. Tiedonkeruulaite sijoitettiin uunihuoneessa olevaan kaappiin, josta oli lyhyt matka useimpien antureiden mittauspisteisiin. Samassa kaapissa oli myös virtalähde, josta saatiin 5 voltin virta kosteusantureille. Anturien johtojen asentamisessa pyrittiin välttämään sähköjohtojen läheisyyttä, jottei mahdolliset häiriöt vaikuttaisi mittaustuloksiin.

4.3 Mittaustulosten käsittely

Mittauksissa käytetty AgilentBenchLink-ohjelma tallensi mittaus datan csv-tiedostoihin. Csv-tiedostot avattiin ja käsiteltiin Excelillä. Lämpötila-anturien mittausdatat olivat ilmoitettu suoraan celsiusasteina. Ilmamäärämittari antoi mittaustuloksen 0–10 voltin jänniteviestinä, joka oli suoraan verrannollinen 0 – 25 000 m³/h ilmavirtaukseen. Kosteusanturien data oli myös jänniteviestin muodossa, josta suhteellinen kosteus saadaan kaavalla: $RH = (V_{out}-0,826)/0,0315$ (Honeywell 2019). Samoissa paikoissa olleiden anturien mittausdatat yhdistettiin laskemalla niistä keskiarvot. Lämmönvaihtimien ja uunin tehot laskettiin lämpötilojen erojen ja ilmamäärän avulla kaavalla 2. Laskuissa käytettiin ilman ominaislämpökapasiteettina arvoa 1010 MJ/kg ja ilman tiheytenä käytettiin arvoa 1,225 kg/m³. Lämmön talteenoton tehon osuus laskettiin kokonaislämmitystehosta. (Lämmön talteenotosta käytetään tästä eteenpäin lyhennettä: LTO).

$$P = q_v * \rho_i * c_i * \Delta T * 2,778 * 10^{-7} \quad (2)$$

jossa

P	=teho (kW)
q_v	=ilman tilavuusvirta (m ³ /h)
ρ_i	=ilman tiheys (kg/m ³)
c_i	=ilman ominaislämpökapasiteetti (MJ/kg)
ΔT	=lämpötilaero (°C)

(Hautala ym. 2013)

Vuosittaista energiansäästöä havainnollistetaan esimerkin avulla, missä on käytetty yleisiä arvoja. Kohdetilan peltoala on 200 hehtaaria ja tilan keskisatona käytetään 5000 kg/ha. Jolloin vuosittaiseksi kokonaiskuivausmääräksi muodostuu 1 000 000 kg. Puita-

van viljan kosteutenä käytetään 20 prosenttia ja puitava vilja kuivataan varastokosteuteen eli 14 prosenttiin. Yhden vesikilon poistamiseksi käytettävä energiamäärä on 1,5 kWh/kg. Kaavalla 3 saadaan poistettavaksi vesimääräksi 75 000 kg. Kuivurin vuotuiseksi energiankulutukseksi muodostuu 112 500 kWh, kun käytetään kaavaa 4. Laskuissa polttoaineen hintana käytetään tämän hetkistä kevyenpolttoöljyn hintaa 1,04 euroa/litra (Tilastokeskus 2019).

$$m_{vpoisto} = m_{sato} * \frac{w_a - w_l}{1 - w_a} \quad (3)$$

jossa

$m_{vpoisto}$ =poistettavan veden määrä (kg)

m_{sato} =viljasadon määrä varastointikosteudessaan (kg)

w_a =puitavan viljan kosteus (%)

w_l =viljan varastointikosteus (%)

(Hautala ym. 2013)

$$E_{kuiv.} = m_{vpoisto} * q_{om} \quad (4)$$

jossa

$E_{kuiv.}$ =kuivurin kuluttaman energian määrä (kWh)

$m_{vpoisto}$ =poistettavan veden määrä (kg)

q_{om} =vedenpoistamisen ominaiskulutus (kWh/kg)

(Hautala ym. 2013)

5 TULOKSET

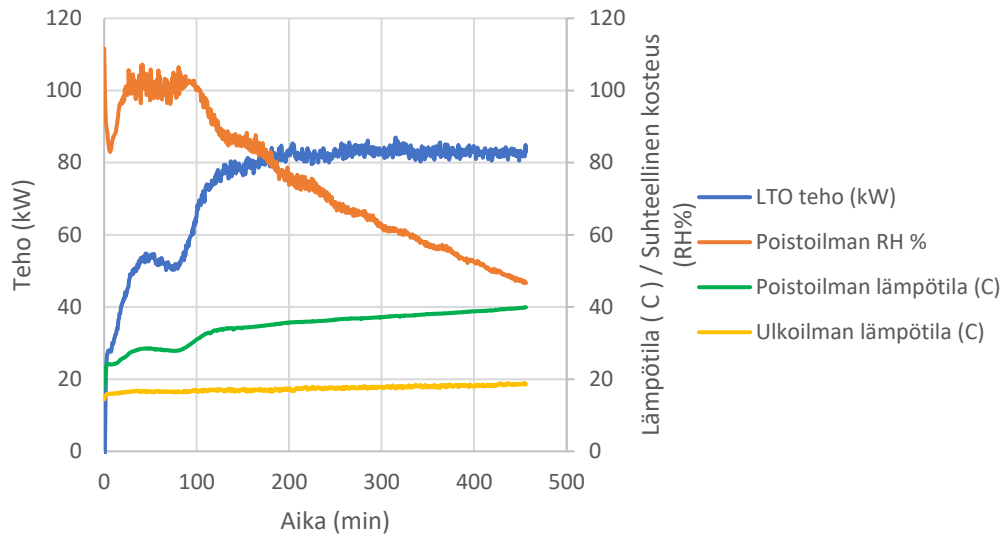
5.1 Kuivauskokeiden tulokset

Kuivauskokeet saatiin suoritettua ilman ongelmia ja ne antoivat hyvän käsityksen lämmön talteenottolaitteiston toimivuudesta. Kuivauskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 1.

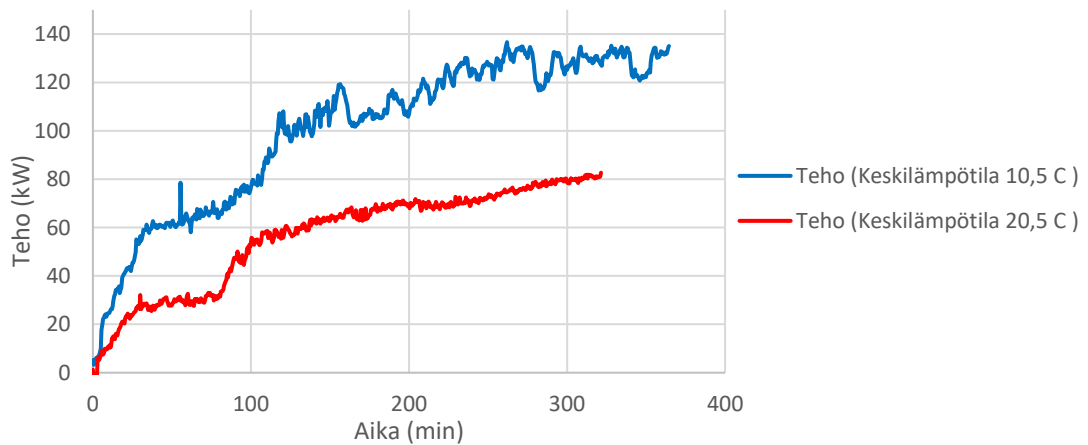
Taulukko 1. Kooste tehdyistä kuivauskokeista. Tehot ja energiankulutukset ovat laskettu kaavalla 2 ilmamäärän ja lämpötilaerojen avulla.

	Kesk. energian säästöprosentti (%)	Alku kosteus (% w.b)	Kuivausaika (min)	Kesk. ulko lämpötila (°C)	Lämmönvaihtimien hyötysuhde (%)	LTO keskimääräinen teho (kW)	Kok. kuivausenergia (kWh)	Kok.L TO energia (kWh)
Ruis120818	17 %	16,5 %	198	15,6	88 %	65	1251	216
Vehnä140818	20 %	24 %	734	14,5	97 %	84	5263	1031
Vehnä150818	21 %	18,5 %	365	10,5	86 %	100	2863	610
Vehnä160818	14 %	18,5 %	322	20,5	89 %	56	2188	302
Vehnä170818	18 %	18,5 %	456	17,4	89 %	74	3205	563
Ohra200818	15 %	16,5 %	237	17,7	88 %	61	1668	242
Ohra210818	21 %	16,5 %	233	8,6	84 %	95	1774	366
Ohra220818-1	15 %	16 %	241	15,2	85 %	61	1673	245
Ohra220818-2	11 %	16 %	173	20	90 %	44	1150	127
Ohra220818-3	13 %	15 %	109	16,4	88 %	46	668	84
Ohra230818	13 %	15 %	135	19,4	90 %	47	839	106
Ohra240818	10 %	15 %	112	22,2	91 %	35	689	66
Ohra270818	17 %	16 %	159	13,3	84 %	60	950	159
Keskiarvot	17 %	17,1 %	267	16,3	88 %	64	1860	317

Lämmön talteenottojärjestelmän hetkellinen teho vaihteli paljon kuivausprosessin vaiheen ja ulkolämpötilan mukaan. Suurimmillaan järjestelmän tuottama hetkellinen teho oli 136 kW (kuva 9) ja keskimäärin sen teho oli noin 64 kW. Laitteiston energiansäästöprosentti vaihteli 10 – 21 % eri kuivauserien välillä. Kuivauskokeiden aikana lämmön talteenottojärjestelmä säästi keskimäärin 17 % kuivausenergiasta. Lämmönvaihtimet toimivat tehokkaasti niiden hyötysuhteen ollessa keskimäärin noin 88 %. Hyötysuhde kertoo, kuinka suuren osan poistoilman lämpötilasta lämmönvaihtimet siirsivät uunille menevään ilmaan. Kuvassa 8 esitetään lämmön talteenoton tehon käyttäytymistä kuivauksen edetessä. Lämmön talteenoton teho nousi kuivauksen edetessä, kun poistoilman suhteellinen kosteus laski ja poistoilman lämpötila nousi. Ulkolämpötilan nousulla oli alentava vaikutus lämmönvaihtimen tehoon (kuva 9). Ulkolämpötila oli kuivauskokeiden aikaan keskimäärin noin 16,3 celsius astetta. Lämmön talteenoton teho nousee keskimäärin noin 100 minuutin aikana (kuvat 8 ja 9).



Kuva 8. Lämmön talteenoton tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Kuivattavana oli lähtökosteudelta 18,5 % olevaa vehnää. Vaakasuora akseli kuvaa aikaa kuivauksen alusta. Kuivaus tehtiin yöllä.



Kuva 9. Ulkolämpötilan vaikutus passiivisen lämmön talteenottojärjestelmän tehoon. Ulkolämpötilakeskimäärin 10,5 ja 20,5 °C. Kuivattavana oli lähtökosteudelta 18,5 % olevaa vehnää. Vaakasuora akseli kuvaa aikaa kuivauksen alusta. Keskiulkolämpötilaltaan 10,5 °C oleva kuivaus tehtiin yöllä ja 20,5 °C oleva tehtiin päivällä.

5.2 Lämmönvaihtimen likaantuminen

Lämmönvaihtimien likaantumista seurattiin mittausten avulla ja silmämääräisesti kuivauskokeiden välillä. Taulukossa 2 on kuvattu lämmönvaihtimien hyötysuhdetta eri kuivauskokeissa. Lisäksi taulukossa on esitetty keskimääräistä ilmamäärää eri kuivauksissa.

Taulukko 2. Lämmönvaihtimien keskimääräinen hyötysuhde sekä keskimääräinen ilmamäärä eri kuivauksissa.

	Lämmönvaihtimien hyötysuhde (%)	Ilman virtaus (m ³ /h)
Ruis120818	88 %	17036
Vehnä140818	97 %	16882
Vehnä150818	86 %	16644
Vehnä160818	89 %	16354
Vehnä170818	89 %	16355
Lämmönvaihtimien pesu		
Ohra200818	88 %	16497
Ohra210818	84 %	16844
Ohra220818-1	85 %	16662
Ohra220818-2	90 %	16614
Ohra220818-3	88 %	16193
Lämmönvaihtimien pesu		
Ohra230818	90 %	16366
Ohra240818	91 %	16814
Ohra270818	84 %	16883

Vehnän kuivausten aikana viljasta irtosi kuoria, jotka päätyivät poistoilman mukana lämmönvaihtimille. Kuivausten edetessä vehnän kuoria kertyi lämmönvaihtimien yläpintaan tukkien osan ilmaraoista. Lämmönvaihtimissa tiivistynyt kosteus edisti roskien tarttumista. Kosteutta tiivistyi etenkin alempaan lämmönvaihtimeen, koska kylmempi ulkoilma aiheutti suuremman lämpötilojen eron lämmönvaihtimeen tulevien virtausten välille. Lämmönvaihtimen rakojen seinämillä ei ollut havaittavissa merkittävää määrää roskaa vehnän kuivausten jälkeen. Lämmönvaihtimien yläpinnalle kertyneiden roskien takia ne pestiin painepesurilla vehnän kuivausten jälkeen. Ohraa kuivatessa poistoilman mukana kulkeutui enemmän pientä roskaa, joka alkoi tarttua myös lämmönvaihtimen pinnoille. Lämmönvaihtimet pestiin viiden ohran kuivauksen jälkeen. Lämmönvaihtimia pestessä niistä irtosi roskista koostuvaa liejua.

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1. Laitteiston toimivuus

6.1.1 Lämmönvaihtimien toimivuus

Lämmönvaihtimet siirsivät lämpöä tehokkaasti kaikissa kuivauskokeissa. Niiden hyötysuhde oli keskimäärin noin 88 %, eikä se ollut missään kokeessa keskimäärin alle 84 %. Valmistajan arvio lämmönvaihtimien tehokkuudeksi oli noin 80 %, mutta lämmönvaihtimiin tiivistyvä kosteus paransi niiden tehokkuutta. Kosteuden tiivistyessä vapautuva latenttilämpö lisäsi lämmönvaihtimien tehokkuutta (Ahokas ja Koivisto 1983).

Lämmönvaihtimet likaantuivat jonkin verran kuivausten edetessä. Vehnän kuivauksissa ongelmaksi osoittautuivat kuoret, jotka tukkivat lämmönvaihtimien yläpintaa. Ohran kuivauksissa pienempi pöly alkoi kertyä lämmönvaihtimen pinnoille. Laitteisto puhdistettiin kaksi kertaa kuivauskokeiden välillä, koska likaantumista oli havaittavissa niin merkittävästi. Jokiniemen (2016) tutkimuksissa käytetyssä 50 mm raot sisältävässä lämmönvaihtimessa ei havaittu likaantumista. Tässä tutkimuksessa käytetyissä lämmönvaihtimissa oli 8 mm raot ja likaantumista tapahtui. Laitteisto ei osoittautunut täysin huoltovapaaksi kuivauskauden aikana. Laitteisto vaatisi jonkinlaisen puhdistusjärjestelmän kuivauskauden aikana tehtävien puhdistustöiden välttämiseksi. Syklonilla olisi mahdollista estää pääosin roskien pääsy lämmönvaihtimille. Sykloni lisää kuitenkin laitteiston hintaa merkittävästi. Jonkinlainen pesulaitteisto voisi olla myös ratkaisu lämmönvaihtimien puhtaana pysymiseen, mutta sekin nostaa laitteiston hintaa ja lisää tekniikkaa laitteistoon.

6.1.2 Mittausten onnistuminen

Mittaustulosten luotettavuuden lisäämiseksi useimpiin mittauskohteisiin asennettiin kaksi samanlaista anturia. Samassa paikassa olleiden anturien tulosten välillä ei ollut havaittavissa merkittäviä eroja. Lämpötila-anturit olivat pääosin asennettu pareittain, mutta esimerkiksi ilmamäärämittarina toimi vain yksi virtauslähetin. Ilmamäärämittarin tuloksissa ei ollut kuitenkaan havaittavissa normaaleista virtausmääristä poikkeavia tuloksia. Kasvukausi 2018 oli hyvin kuiva, millä oli myös vaikutuksia viljankuivaukselle. Sadon määrä jäi pienemmäksi, jolloin kuivauskokeiden määräkin jäi pienemmäksi.

Kuivattavan viljan kosteudet olivat myös keskimääräistä matalammat, joka heikensi myös lämmön talteenoton tuloksia (Kirkkari ym. 2005).

6.2 Lämmön talteenoton energian säästö

6.2.1 Lämmön talteenoton energian säästö

Tehtyjen kuivauskokeiden avulla määriteltiin keskimääräiseksi lämmön talteenoton energiansäästöprosentiksi 17 %. Energiansäästö oli hyvin saman suuruinen kuin Jokiniemen (2016) pienoiskuivurilla saama noin 18 % energiansäästö. Tulos oli myös Sokhansanj ja Bakker-Arkeman (1981) tutkimuksissa saavutetun 18 % kanssa hyvin samanlainen. Myös Ahokkaan ja Koiviston (1983) tekemissä kokeissa päästiin hyvin samanlaisiin tuloksiin, noin 15 – 25 % energiansäästöön. Kuivauskokeissa käytettiin pääosin noin 90 celsiusasteen kuivauslämpötilaa, joka ovat hieman korkeampi kuin yleensä. Korkeammat kuivauslämpötilat pienentävät myös passiivisella lämmön talteenotolla korvattavan energian osuutta. Korkeammat kuivauslämpötilat toisaalta nostavat mahdollisesti poistoilman lämpötilaa, mikä lisää lämmön talteenoton potentiaalia. Kuivauskokeissa ulkolämpötila oli keskimäärin noin 16,3 °C. Keskimääräistä korkeampi ulkolämpötila vähentää suoran lämpötilan eron kautta saatavaa energiaa. Keskimääräistä korkeampi ulkolämpötila vähentää myös poistoilman kosteuden tiivistymistä lämmönvaihtimille, mikä vähentää poistoilmasta saatavan latenttilämmön osuutta.

Kuivauksen pituudella ja sitä kautta lähtökosteudella on huomattavasti vaikutusta lämmön talteenoton säästöön. Lämmön talteenoton tehon nouseminen tapahtuu kuivauksen edetessä, kun kuivauksen teho alkaa heikentyä noin 100 minuutin kuivaamisen jälkeen. Kuivauksen tehokkuus alkaa heikentyä poistoilman kosteuden laskiessa ja sen lämpötilan noustessa (Ahokas ja Koivisto 1983). Kuivauskokeissa lähtökosteudet olivat keskimääräistä alhaisempia, jolloin myös kuivausajat jäivät hyvin lyhyiksi. Lyhyet kuivausajat vähensivät lämmön talteenoton energiansäästön osuutta, koska sen tehokkaampi käyttöaika jäi lyhyemmäksi.

Tutkimuskohteessa lämmön talteenottojärjestelmän asentaminen nosti kuivurin sähkönkulutusta ilman virtauksen vastapaineen lisääntyessä. Tutkimuskohteessa olemassa olleiden aksiaalipuhaltimien tehoa piti nostaa ja lämmön talteenottojärjestelmään piti lisätä yksi puhallin. Lisäpuhaltimen asentamisen ja alkuperäisten puhaltimien tehon nosta-

misen myötä sähkötehon kulutus nousi noin 10 kW, mikä oli sen jälkeen yhteensä noin 22,5 kW.

6.2.2 Lämmön talteenoton vuosittainen energiansäästö

Käyttämällä kuivauksessa poistoilman lämmön talteenottojärjestelmää säästetään mitausten perusteella noin 17 % energiaa. Eli 200 ha tilalla 5000 kg/ha keskisadon kuivausmäärällä kuivausenergian säästö olisi 19 125 kWh vuodessa. Vuodessa säästettävä energiamäärä vastaa noin 1913 litraa kevyttä polttoöljyä, kun käytetään kevyen polttoöljyn lämpöarvona 10 kWh/litra.

6.3 Lämmön talteenoton kannattavuus

6.3.1 Lämmön talteenottolaitteiston investointi

Energiansäästöinvestointeja tehdessä on tärkeää saavuttaa investoinnille riittävä kannattavuus. Investoinnin suuruuden ja vuosittain säästyvän energian avulla on mahdollista laskea investoinnin kannattavuutta. Myös mahdolliset huolto- ja puhdistustyöt pitää ottaa huomioon kannattavuutta laskettaessa. Kuivauskustannukset vaihtelevat tilakohteisesti sekä vaihtelua saattaa olla huomattavasti myös eri vuosien välillä. Laitteistosta ei ole vielä kaupallista versiota, joten sen hinnan määrittäminen on arvio. Laitteiston investoinnin hinnaksi arvioitiin noin 24 000 euroa, siten että se sisältäisi myös puhdistussyklonin sekä asennuskulut. Taulukossa 3 on vertailtu lämmön talteenottojärjestelmällä varustetun kuivurin kustannuksia ilman järjestelmää olevaan kuivuriin. Taulukosta 3 havaitaan lämmön talteenottojärjestelmän säästävän 490 euroa vuodessa esimerkkitalan tapauksessa.

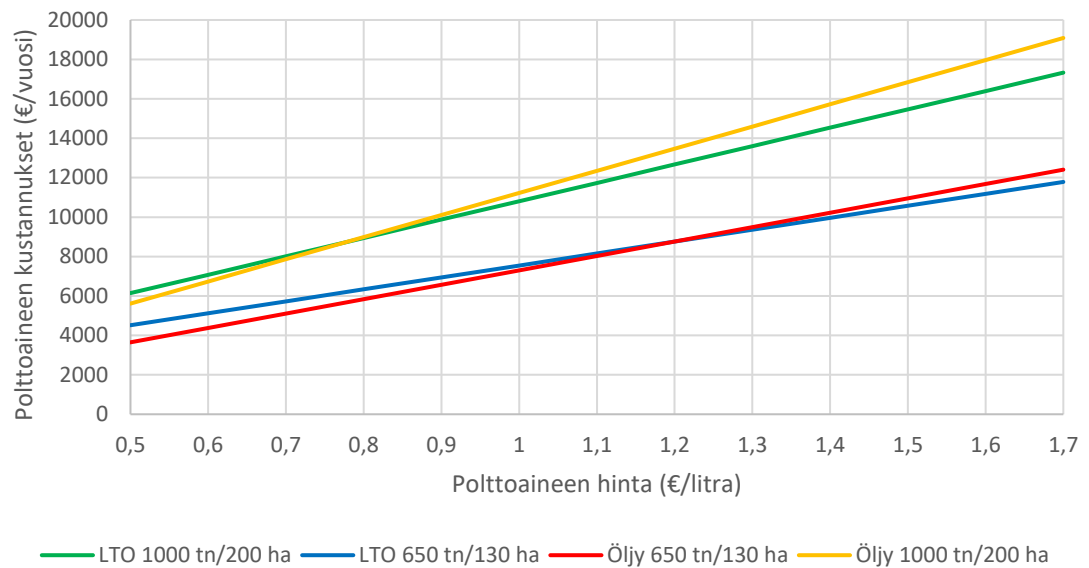
Taulukko 3. Lämmön talteenottojärjestelmän käytöstä muodostuvat kustannukset öljylämmitykseen verrattuna, kun kuivattavana on 200 ha ala, sato 5 tn/ha ja puintikosteus 20 %. Poistoaikana käytetään 15 vuotta ja korkokantana käytetään 5 %. Lämmön talteenottojärjestelmän energian säästönä käytetään 17 %. Laskelmassa ei oteta huomioon muita kuivauksen kustannuksia, kuin polttoainekulut ja lämmön talteenottojärjestelmästä muodostuvat kustannukset.

	LTO, €	Öljy, €
Hankintahinta	24000	
Inv. Tuki	40 %	
Kustannus inv. tuen jälk.	14400	
Vuotuinen korko	427	
Polttoaineet	9654	11631
Ylläpito	100	
Vuosikustannus	11141	11631

6.3.2 Investoinnin kannattavuus

Seuraavissa kannattavuuslaskelmissa käytetään edellisessä kappaleessa esitettyjä arvoja. Laskuissa lämmönlähteen polttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä. Laskuissa investoinnin poistoaikana käytetään 15 vuotta ja laskentakorkona 5 %. Energian hinnan odotetaan nousevan tulevaisuudessa, minkä vaikutusta on havainnoitu kuvassa 10.

Polttoaineen hinta vaikuttaa hyvin paljon lämmön talteenoton kannattavuuteen (kuva 10). Pienemmällä 650 000 kg kuivausmäärällä lämmön talteenottojärjestelmän kannattavuus saavutetaan vasta kun polttoaineen hinta on yli 1,2 euroa litralta. Suuremmalla 1 000 000 kg kuivausmäärällä lämmön talteenottojärjestelmän kannattavuus saavutetaan aikaisemmin, kun polttoaineen hinta nousee yli 0,8 euroa litralta.



Kuva 10. Laskelma polttoaineen hinnan vaikutuksesta vuosittaisiin kustannuksiin kahdella eri tilakoolla 130 ja 200 hehtaarin aloilla 5000 kg/ha keskisadolla, mitkä vastaavat 650 000 ja 1 000 000 kg viljamääriä. Lämmön talteenottojärjestelmän (LTO) investointiaikana on käytetty 15 vuotta.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa mahdollisimman toimiva ja kustannustehokas passiivinen lämmön talteenottojärjestelmä viljankuivaukseen. Viljan-
kuivauksen lämmön talteenoton haasteena on ollut roskainen ja kostea poistoilma sekä lyhyt käyttökausi. Toimivaa ja riittävän kustannustehokasta keinoa ei ole ollut saatavilla eikä käytännön kokoluokan kuivureiden passiivisen lämmön talteenoton käytöstä ole tutkimustietoa. Lämmön talteenottolaitteistoa suunniteltaessa ja rakentaessa käytettiin aikaisemmin pienoiskuivureiden kanssa tehtyjen tutkimusten havaintoja hyväksi.

Tutkimuksessa havaittiin kahden sarjaan asennetun ristivirta ilma-ilma-
levylämmönvaihtimen toimivan lupaavasti. Lämmönvaihtimien sarjaan kytkeminen
nosti ilman virtausnopeutta, joka paransi roskien kulkeutumista pois lämmönvaihtimista
sekä teki ilman virtauksesta turbulentimpaa. Turbulentti virtaus esti eristävän rajaker-
roksen syntymisen lämmönsiirtopinnoille, jolloin lämmönvaihtimet toimivat tehok-
kaammin. Sarjaan kytkentä tehosti myös lämmönvaihtimien toimintaa ja niiden hyöty-
suhde pysyi hyvällä tasolla kaikissa kokeissa. Poistoilman johtaminen ylhäältä alaspäin
osoittautui toimivaksi etenkin poistoilman roskien ja tiivistyvän veden kulun kannalta
lämmönvaihtimista. Lämmönvaihtimet likaantuivat kuitenkin jonkin verran.

Lämmön talteenottojärjestelmän käyttökauden aikaisen huoltovapauden saavuttamiseksi
se pitäisi varustaa puhdistussyklonilla tai pesulaitteistolla. Ne nostavat kuitenkin samal-
la laitteiston hintaa, sekä heikentävät sen kannattavuutta. Puhdistussykloni myös lisää
järjestelmän vastapainetta, mikä lisää puhaltimien tehontarvetta. Lämmön talteenottojär-
jestelmän investoinnista on mahdollistaa saada kannattava myös puhdistussyklonin
kanssa. Mahdollisesti tulevaisuudessa energian hinnan noustessa myös lämmön talteen-
oton kannattavuus paranee. Myös epäsuotuisammat kuivausolosuhteet parantavat läm-
mön talteenoton kannattavuutta merkittävästi. Mahdollisia jatkotutkimuksia voisi tehdä
kustannustehokkaan pesulaitteiston suunnittelusta ja toiminnasta.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää työtä ohjanneita professori Laura Alakukkua ja tohtori Tapani Jokiniemeä. Haluan kiittää heitä myös VILKUTEK -hankkeen järjestelyistä. Kiitokset hankkeen rahoittajalle Marjatta ja Eino Kollin säätiölle. Kiitokset myös hankkeessa mukana olleille yrityksille Antti-Teollisuus Oy ja Ekocoil Oy.

9 LÄHTEET

Ahokas, J. & Koivisto, K. 1983. Energiansäästö viljankuivauksessa. Tutkimusselostus

31. Valtion maatalousteknologian tutkimuslaitos. Vakola.

Saatavilla: Maataloustieteiden osasto.

Antti-Teollisuus Oy 2018. Asennus- ja käyttöohje RADIAALIPUHALLINYKSIKÖT

<https://antti-teollisuus.fi/wp-content/uploads/408099-Puhaltimet-fi-06-2014.pdf>.

Viitattu 13.12.2018

Alfa Laval 2019. The theory behind heat transfer.

<https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/local/united-states/hvac/the-theory-behind-heat-transfer.pdf>. Viitattu 7.1.2019

Ekocoil 2019. Led ristivirta lämmönvaihdin.

http://www.ekocoil.fi/assets/led_ristivirta.pdf. Viitattu 23.1.2019

Fagerholm, N. 1986. Termodynamiikka 479. Finnish.Otaniemi, Espoo: Otakustantamo :

382. Saatavilla: Maataloustieteiden osasto.

Hautala, M., Jokiniemi, T. & Ahokas, J. 2013. Maatilakuivurit.

<http://www.energia-akatemia.fi/attachments/article/59/Maatilakuivurit.pdf>.

Viitattu 16.1.2019

Honeywell 2019. HIH-4000 Series Humidity Sensors.

<https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hih4000-series-product-sheet-009017-5-en.pdf> Viitattu 23.1.2019

HK Instruments 2017. Ilmanvirtauslähettimet DPT-flow. http://hkinstruments.fi/wp-content/uploads/2017/08/DPT_Flow_Datasheet_Suomi-4.0.pdf.

Viitattu 23.1.2019

Hokajärvi, E. 1986. Lämmön siirtyminen. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 86,
Saatavilla: Maataloustieteiden osasto.

Jokilaakso, A. 1987. Virtaustekniikan, lämmönsiirron ja aineensiirron perusteet. Ota-
kustantamo. Saatavilla: Maataloustieteiden osasto.

Jokiniemi, T. 2016. Energy efficiency in grain preservation. Helsingin yliopisto, maata-
lous-metsätieteellinen tiedekunta, maataloustieteiden laitos.
Saatavilla: Maataloustieteiden osasto

Juusela, K. 2017. Lämmöntalteenotto viljankuivauksessa lämpöpumpulla. Kandidaatin-
tutkielma. Helsingin yliopisto.

Kirkkari, A., Kirkkari, A., Palva, R. & Teräväinen, H. 2005. Viljasadon käsittely ja
käyttö. ProAgria maaseutukeskusten liitto. Maa- ja elintarviketalouden tutkimus-
keskus. Vantaa ja Jokioinen. Saatavilla: Viikin kampuskirjasto.

Lampinen, M. J., Mamdouh, E. H. A., & Kotiaho, V. 2008. Lämmönsiirto-oppi, Aalto
University, Department of energy engineering,
Saatavilla: Aalto University Learning Centre.

Manni, J. 1991. Pölyn ja roskien talteenotto lämminilmaukuvaamossa. Valtion maata-
lousteknologian tutkimuslaitos.

http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/482523/vtiedote50_91.pdf?sequence=1

Viitattu 10.1.2019

Motiva 2019. Energiatehokas lämmönsiirto opas.

https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf.

Viitattu 15.1.2019

Palva, R. & Lötjönen, T. 2005. Viljasadon korjuu- ja käsittelykustannukset: Taloudellinen kuivaus. Viljasadon käsittely ja käyttö.

Saatavilla: Viikin kampuskirjasto

Peltola, A. 1997. Viljaa kierrättävän lämminilma kuivurin säädöt. Työtehoseura.

Saatavilla: Viikin kampuskirjasto.

Pietiko 2019. Termoelementti- ja vastusanturit.

<https://www.pietiko.fi/mittaustietoa/termoelementti--ja-vastusanturit>.

Viitattu 23.1.2019

Pihkala, J. 1998. Prosessitekniikan yksiköprosessit. Opetushallitus. Helsinki.

Saatavilla: Maataloustieteiden osasto.

Sariola, J., Tuunanen, L., Eskelinen, T., Louhelainen, K. & Ripatti, T.

1992. Viljankuivauksen pölyhaitat. Valtion maatalousteknologian tutkimuslaitos.

<http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/484447/vtselostus61.pdf?sequence=1>.

Viitattu: 10.1.2019

Sokhansanj, S; Bakker-Arkema, FW. 1981. Waste heat recovery in grain dryers, American Society of Agricultural and Biological Engineers.

<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=34442>. Viitattu: 15.01.2019

Suomala, E. & Peltola, A. 1988. Kuivausilman lämpötilan ja kuivurin sisäisten kuumien metallipintojen vaikutus ohran elinvoimaan viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa. Työtehoseuran maatalous- ja rakennusosaston monisteita 1/1988. Saatavilla: Maataloustieteiden osasto.

Suomi, P., Lötjönen, T., Mikkola, H. J., Kirkkari, A. & Palva, R. 2003. Viljan korjuu ja varastointi laajenevalla viljatilalla. Saatavilla: Viikin kampuskirjasto.

Teca 2018. Cyclone type NC 500-2500 technical leaflet.

https://www.teca.fi/Download/27182/cyclone-nc500_2500_technical_leaflet.pdf.

Viitattu 13.12.2018

Tilastokeskus 2019. Energian hinnat. <http://www.stat.fi/til/ehi/index.html>.

Viitattu 4.1.2019

Ruokavirasto 2019. Tuen määrä tukikohteittain investointituet.

<https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/viljelijat/tuet-ja-rahoitus/tuen-maara-tukikohteittain-investointituet.pdf>. Viitattu 14.1.2019